

Abstrakt

Práce na téma „Integrita povrchu po řezání vodním paprskem“ se zabývá popisem problematiky progresivní nekonvenční technologie řezání hydroabrazivním paprskem, zkoumá integritu povrchu po řezání AWJ a rozebírá vybrané vlivy na výsledek řezného procesu. Dále jsou zde zmíněné jevy doprovázející řezný proces a různé technologické aplikace AWJ.

Klíčová slova

AWJ, WJM, technologie, řezání, povrch

Abstract

Thesis on subject "Surface integrity after waterjet cutting process" describes problem of the progressive advanced technology, unconventional hydroabrasive jet cutting, examines the integrity of the surface after cutting AWJ and discusses selected factors on the outcome of the cutting process. Also, there are mentioned accompany effects of cutting process and the various applications of AWJ.

Key words

AWJ, WJM, technology, cutting, surface

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PEŠATA, Jan. *Integrita povrchu po řezání vodním paprskem: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2010. 40s. Vedoucí práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Integrita povrchu po řezání vodním paprskem“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Vlastnoruční podpis bakaláře

.....

Jméno a příjmení bakaláře

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Obsah

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	8
1. Dělení materiálu kapalinovým paprskem.....	9
1.1. Princip obrábění vodním paprskem.....	9
1.1.1. WJM – water jet machining.....	10
1.1.2. AWJ – abrasive water jet	10
1.2. Charakteristika technologie dělení materiálu.....	10
1.2.1. Zařízení pro vodní paprsek.....	12
1.2.2. Abrazivo.....	15
1.2.3. Kapalina.....	17
1.3. Uběr materiálu.....	18
2. Stroje pro řezání AWJ/WJM.....	19
3. Integrita povrchu.....	20
3.1. Charakteristické jevy doprovázející řezný proces.....	20
3.1.1. Vznik kvalitativně odlišných zón a rýhování výsledného povrchu řezaného materiálu.....	21
3.1.2. Vznik specifického trojúhelníkového tvaru.....	24
3.1.3. Vlastnosti řezné spáry.....	25
3.2. Vliv mechanicko – fyzikálních vlastností materiálu na řezný proces.....	26
3.3. Porovnání technologie AWJ s ostatními netradičními metodami.....	27
4. Technologické aplikace AWJ.....	28
4.1. Soustružení pomocí AWJ.....	28
4.2. Vrtání.....	29
4.3. Frézování pomocí AWJ.....	29
4.4. Gravirování pomocí AWJ.....	31
Závěr.....	34
Seznam použitých zdrojů.....	35
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	37

Úvod

Metoda řezání vysokotlakým vodním paprskem je moderní přesnou technologií pro dělení většiny deskových materiálů (kovy, plasty, pryže, skla, kámen, keramika atd.) Tato technologie byla vyvíjena od přelomu sedmdesátých a osmdesátých let. V počátku byla uplatňována především pro vojenský a kosmický program. Dnes se celosvětově rozšiřuje do všech oblastí průmyslu.

Základem každého řezacího systému je vysokotlaké čerpadlo, které prostřednictvím multiplikátoru generuje tlak vody až přes 400 MPa (4 000 Bar). V dnešní době se v průmyslu testují stroje s pracovním tlakem až 6 000 Bar i vyšším. Tyto stroje, ale zatím doplácí na svůj vyšší výkon menší životností mnoha komponent.

Samotné řezání je prováděno tak, že vysokotlakým vedením je voda dopravována k řezací hlavě, kde je systémem trysek vytvořen vlastní řezací nástroj. Může to být cca 0,15-0,30 mm široký vodní paprsek, který je schopný řezat měkčí materiály jako je dřevo, guma, plasty, korek apod. Častěji využívanou možností je cca 0,8-1,5 mm široký hydroabrazivní paprsek s příměsí brusného prášku (nejčastěji granátového písku). Hydroabrazivní paprsek je díky své vysoké energii schopný řezat kovy, kámen, sklo i jiné materiály v tloušťkách 100mm i více.

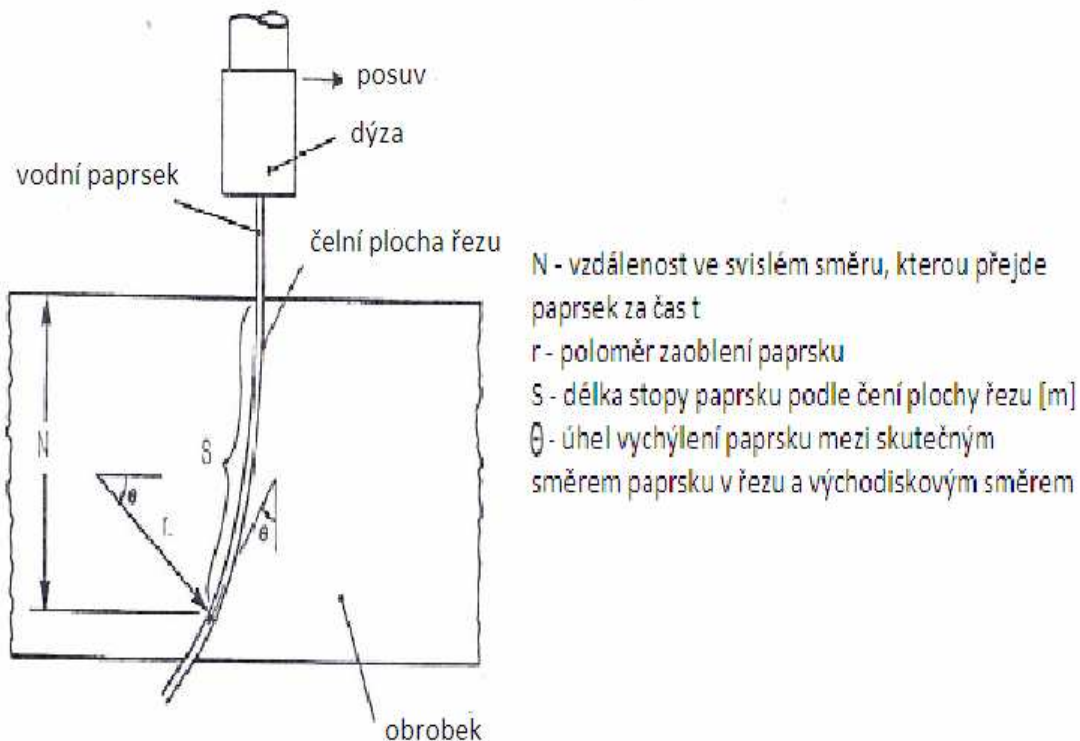


Obr.1 Ukázka efektivního řezání dvěma hlavami.

1. Dělení materiálu kapalinovým paprskem

1.1 Princip obrábění vodním paprskem

Princip obrábění vodním paprskem využívá mechanicko – fyzikální podstatu úběru materiálu. To znamená, že paprsek vody jako řezný nástroj o velmi vysokém tlaku kapaliny (nejčastěji vody o tlaku přes 400 nebo až 690 MPa v závislosti na strojním zařízení) protéká tryskou malého průměru (okolo 0,3 mm), a tím získává velmi vysokou kinetickou energii. Proud vody vniká do obrobku, postupně ztrácí svou kinetickou energii a vychyluje se. Na Obr.1.1. je zobrazen průběh dráhy vodního paprsku a jeho vychýlení. Rozdíl mezi WJM a AWJ je v přidávání jemného brusiva do proudu vody. Tento flexibilní nástroj je schopen obrábět téměř všechny technické materiály. Z hlediska použití pracovního média rozlišujeme dvě metody obrábění. (1,4,11)



Obr.1.1. Schematické znázornění průběhu paprsku a jeho vychýlení (11)

1.1.1 WJM – Water Jet Machining

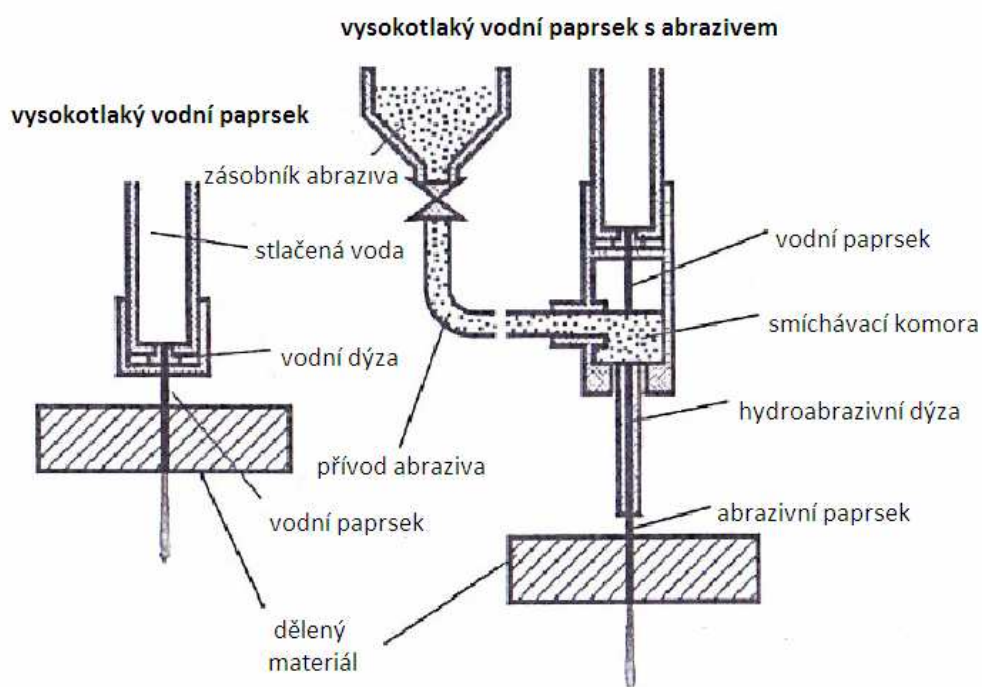
Je to hydrodynamické obrábění, které používá čistý vodní paprsek. Využívá se spíše pro řezání měkkých, tenkých, méně houževnatých a nekovových materiálů jako například (plasty, dřevo, papír, textil apod.). (1,5)

1.1.2 AWJ – Abrasive Water Jet Machining

Je to obrábění vodním paprskem s příměsí abraziva, nebo-li hydroabrazivní obrábění. Toto obrábění umožňuje řezání silnějších, hutnějších a velmi tvrdých materiálů jako například (slitiny, sklo, železné i neželezné kovy apod.). (1,5)

1.2. Charakteristika technologie dělení materiálu

Při zpracování měkkých materiálu se používá vodní čistý vodní paprsek, ale pro ostatní případy je třeba použít abrazivní vodní paprsek. Přidáním abraziva se účinek při řezání vodním paprskem znásobuje. (1)



Obr.1.2. Zjednodušený model technologie WJM a AWJ (11)

Výhody:

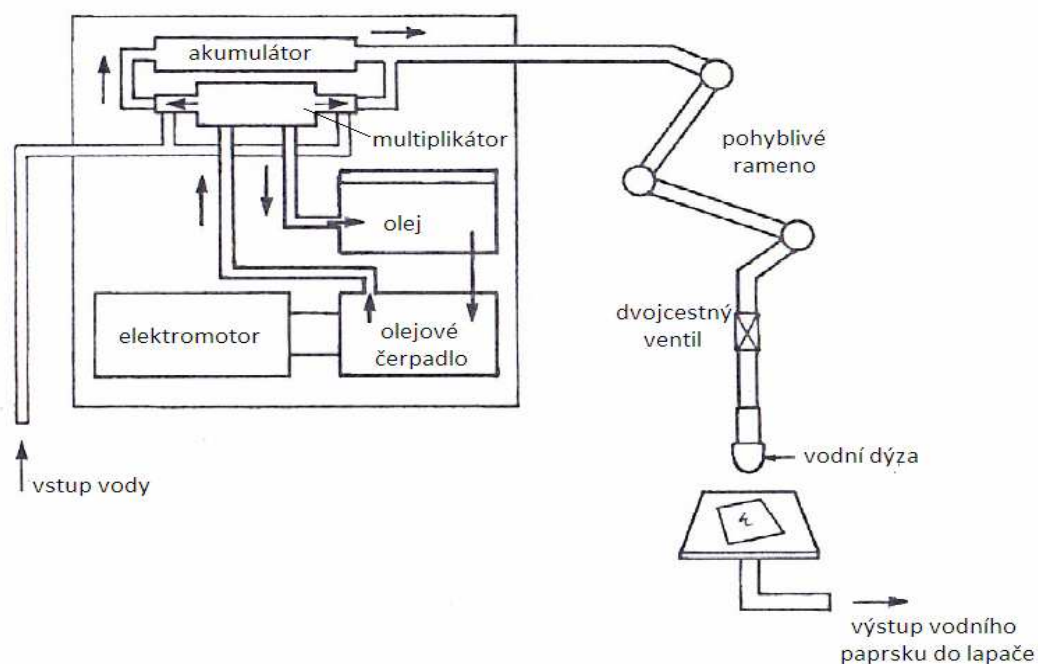
- Řez probíhá bez tepelného působení (max. ohřev cca 40-50°C). Tím pádem obráběný materiál nevykazuje fyzikální, chemické ani mechanické změny a je snadno následně obrobitelný.
- Možnost řezu jakýchkoli materiálů včetně kovů a slitin i kalených či jinak modifikovaných, dále také těžko opracovatelných materiálů jako například sklolaminátů, skel, gumotextitů, měkkých i tvrdých pryží, plastů, těsnění a pod.
- Vysoká přesnost dílů.
- Minimální silové působení paprsku na dělený materiál (nedochází ke vzniku mikrotrhlin).
- Při řezu se neporuší ani případná povrchová úprava - leštění, broušení atd.
- Možnost nahrazení souboru operací (dělení, vrtání, frézování, soustružení atd.) jediným technologickým procesem.
- Možnost volby kvality řezu od nejlepší s drsností Ra pod 3,2 až po hrubý dělicí řez výrazně rýhovaný s výraznými rozdíly ceny.
- V kvalitnějším řezu už není většinou nutné již žádné další opracování.
- Tvarové omezení řezu je dáno pouze a jenom kruhovitým průřezem paprsku, je možno řezat i velice detailní kontury.
- Při řezu nevznikají žádné ekologicky nevhodné zplodiny, takže jde o technologii přátelskou k životnímu prostředí (4,6)

Nevýhody:

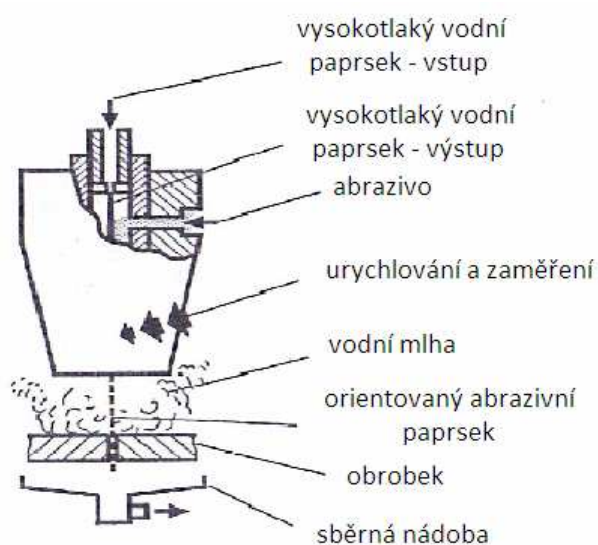
- Nevyhnutelný kontakt s vodou a abrazivním materiálem (bez okamžitého vhodného ošetření rychlý nástup povrchové koroze, u nasákavých materiálů delší vysoušení, možnost změny barvy, znečištění apod.)
- Vysoké investiční a provozní náklady.
- Relativně nízká rychlost posuvu řezné hlavy při obrábění materiálů s vysokou tvrdostí.
- Velmi vysoká hlučnost (více jak 100 dB). (4,6)

1.2.1 Zařízení pro vodní paprsek

Hlavní prvky zařízení jsou zobrazeny na obr.1.3. Patří mezi ně hydraulická jednotka, multiplikátor, akumulátor, filtry, potrubí na rozvod vody, dvojcestný přípustný ventil, dýza, nádoba na zachytávání vody (lapač vody), přísady na úpravu vody. Detail principu zařízení abrazivního vodního paprsku je znázorněn na obr. 1.4.(11)



Obr.1.3. Hlavní komponenty zařízení (11)



Obr.1.4. Princip abrazivního vodního paprsku (11)

Hydraulická jednotka - Slouží k vygenerování vysokého tlaku vodního paprsku pomocí systému hydraulických pump. Vysokotlaký vodní paprsek se potom generuje hydraulickým zařízením s multiplikátorem. Druh konstrukce závisí na výrobci. (11)

Multiplikátor - Je částí hydraulické jednotky. Používá se na zvýšení tlaku vody asi na 380 MPa. (11)

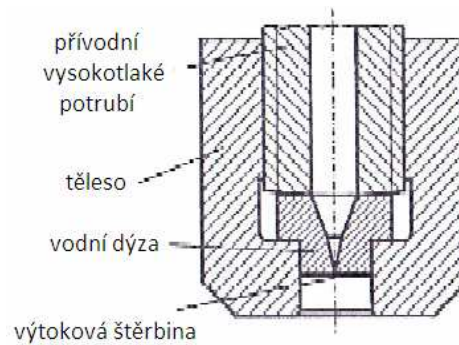
Akumulátor tlaku - Je vysokotlaká nádoba, která tlumí rázy v kapalině vyvolané vznikem pulzace paprsku jako následek stlačení vody. (11)

Filtry - Jsou neoddělitelná součást zařízení. Filtrují kapalinu a zachycují nečistoty do velikosti 1,2 až 0,5 μm . Dále chrání štěrbinu v dýze před možným poškozením cizími příměsy. (11)

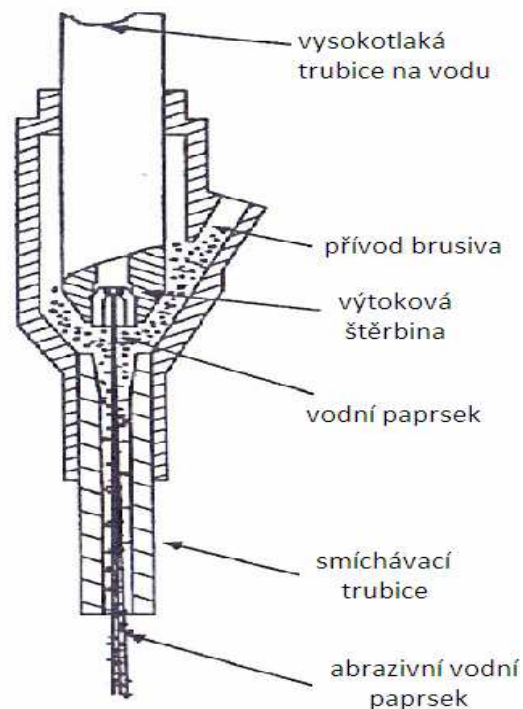
Potrubí na rozvod vody - Skládá se z různých druhů armatur a spojovacích elementů vyrobených z nerezové oceli většinou s průměrem 6 až 14 mm. Potrubí je přizpůsobené flexibilnímu pohybu řezací hlavy. V dnešní době jsou tyto komponenty normalizované a standardizované. (11)

Dvojcestný ventil - Řídí postup řezání přívodem respektive zastavením přívodu proudu kapaliny. (11)

Dýza - Je to základní a nejdůležitější část zařízení. Ovlivňuje kvalitu řezného paprsku i kvalitu řezu. Úzký výtokový otvor v dýze (štěrbina) s průměrem od 0,075 mm se vyrábí ze safíru a nebo ze slinutého karbidu. V současné době se safírové části dýzy nahrazují diamantem, který má desetinásobně vyšší pracovní životnost. Průměrná doba práce safírové dýzy je okolo 200 hodin. Po této době se výtoková štěrbinu dýzy zanesou nečistotami a minerálními usazeninami z vody. Výhodou diamantové dýzy je, že se diamantová štěrbinu může vícekrát pročistit. I po pročištění bude diamantová dýza produkovat stejný vysokotlaký paprsek. Cena diamantové dýzy je 7 až 10 krát vyšší než safírové. Příklad konstrukce dýzy pro čistý vodní paprsek je na obr.1.5. (11)

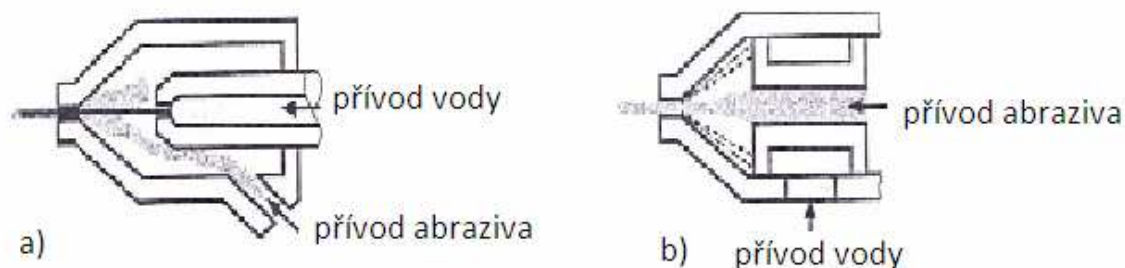


Obr.1.5. Konstrukce dýzy pro čistý vodní paprsek (11)



Obr.1.6.Koncept Dýzy pro obrábění AWJ paprskem (11)

Rozdíl mezi čistým vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem spočívá v přidávání jemného brusiva do proudu vody přes různé systémy přívodních mechanismů, k čemuž je přizpůsobená konstrukce dýz. Na obr.1.6. jsou zobrazeny dýzy pro různé typy přívodu brusiva a jeho smíchávání s vodou. (11)



Obr.1.7. Dýzy pro AWJ (11)

- a) Dýza s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva.
- b) Dýza se smíšeným vodním paprskem a axiálním přívodem brusiva.

Lapač vody - Je nádoba na zachytávání vodního paprsku, který prochází přes materiál. Také slouží ke tlumení hluku a zároveň zachytává třísku. Hladina hluku při používání AWJ je velmi vysoká a může dosahovat i víc jak 105 dB. Lapač musí být dostatečně hluboký, aby bylo zabezpečené lámání paprsku ještě před dosažením dna. Požadovaná hloubka nádoby je 300 až 600 mm. V případě nedostatku prostoru pro dostatečnou hloubku nádoby se může použít u nižší nádoba naplněná kovovými kuličkami. (11)

1.2.2 Abrazivo

Abrazivum je směs částic materiálů s výraznou abrazivní schopností a tvrdostí. Nejčastěji jsou to minerály (jako je například olivín nebo granát) nebo křemičité písky. Přidáním abraziva se účinek řezání značně znásobuje. Při AWJ můžeme použít spoustu abraziv, jelikož každé z nich má své specifické výhody a vlastnosti. Druh abraziva se volí v závislosti na parametrech stroje, druhu řezaného materiálu, požadované kvalitě výstupního povrchu a na dostupnosti a ekonomické náročnosti abraziva. (1,4)

Abrazivum	Spec. hmotnost [g/cm ³]	Tvrdost Knoop	Tvar částic
SiC	3,2	2500	nepravidelně ostrohranný
Granát $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	3,4 – 4,3	1350	nepravidelně ostrohranný
Si písek	1,5	700	nepravidelně kulový
Ocelové špony	cca 7	400 – 800	nepravidelně kulový
skleněné kuličky	2,5	300 – 600	kulový

Tab.1. Příklad abrazivních materiálů a jejich vlastnosti (1)

Při výběru vhodného abraziva se vždy volí kompromis mezi těmito faktory:

- Tvrdost abraziva – tvrdší abraziva se vyznačují vyšší účinností při dělení materiálů, ale na druhé straně dochází k rychlejšímu opotřebení zaostřovací trubice.
- Tvar abrazivních zrn – při použití kulatějších zrn se docílí menší drsnosti povrchu, ale také menší hloubky dělicího řezu.
- Velikost abrazivních zrn – při řezání za použití menších částic se dosáhne nižší drsnosti povrchu, ale zvýší se čas potřebný k prořezání materiálu
- Hmotnostní tok abraziva – se zvyšujícím hmotnostním tokem se zvyšuje také kinetická energie paprsku a tím i dosahovaná hloubka dělicího řezu. Ale při překročení kritického hmotnostního toku abraziva dosahovaná hloubka dělicího řezu klesá.
- Ekologičnost abraziva – ne všechna abraziva splňují bezpečnostní a zdravotní požadavky na nezávadnost.
- Cena abraziva (4)



Obr.1.8.Abrazivum - Koncentrát připravený z granátu almandinu pro použití v technologii abrazivního vodního paprsku (3)

Například z dosavadních výzkumů vyplynulo, že pro řezání skla je použití levnějšího křemíkového písku výhodnější. Sice zpomaluje proces řezání o 20 až 35%, ale v závislosti na ostatních parametrech při procesu řezání (jako je opotřebení trysky stroje apod.) jsou u něj nižší náklady než při použití dražšího granátu nebo oxidu hliníku. Obecně platí pravidlo, že čím je zrna abraziva menší tím je povrch řezu hladší, avšak stoupá spotřeba tohoto abraziva. Při použití většího množství abraziva můžeme dosáhnout rychlejšího řezání a větší hloubky prořezu, ale zvyšuje se tím cena za řezání. (1)

1.2.3 Kapalina

Kapalina pro AWJ je základní faktor, který ovlivňuje efektivnost technologie. Pracovní kapalina pro AWJ musí splňovat některé požadavky a to:

- Nízkou viskozitu, která zabezpečí malé ztráty výkonu toku kapaliny při průtoku potrubím, hadicemi apod.
- Běžnou přístupnost a nízkou cenu.
- Minimální ovlivnění kovových částí zařízení korozí.
- Zabezpečovat co nejlepší jakost obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku.

Některé z požadavků se mohou vzájemně vylučovat, avšak z globálního pohledu splňuje požadavky nejlépe voda, která je nejdostupnější, nejlevnější a je ekologická. (4)

1.3 Úběr materiálu

Provozní charakteristiky vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku, které ovlivňují úběr materiálu, kvalitu opracovaného povrchu a účinnost procesu jsou:

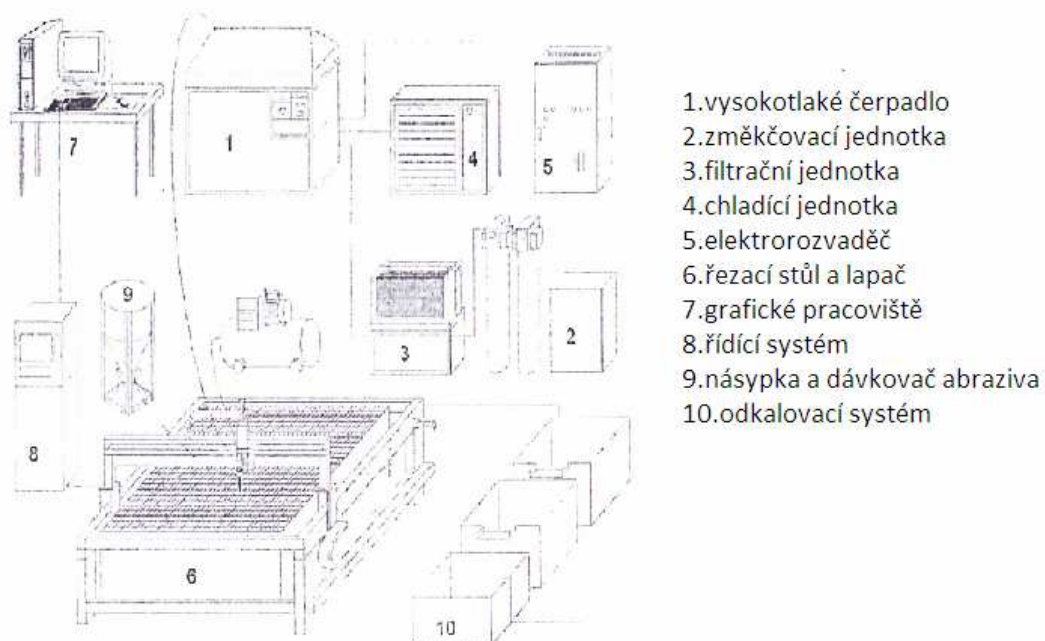
- tlak vody, rychlost proudění a rozměry otvoru dýzy
- vzdálenost mezi dýzou a obrobkem
- úhel sklonu vodního paprsku
- druh a velikost brusiva (11)

Materiál	Tloušťka [mm]	Řezná rychlost [m/min]
měkká ocel	1,6	0,5
	13	0,1
	50	0,038
	180	0,01
Korozivzdorná ocel	5	0,4
	13	0,15
	25	0,076
Hliník	1,6	1,3
	6	0,5
	25	0,13
	100	0,025
Titan	3	0,5
	6	0,4
	12	0,1
Sklo	13	1,3
	19	0,6
	25	0,13
Mramor	50	0,4
Beton	250	0,025

Tab.2. Rychlosti řezání AWJ paprskem (11)

2. Stroje pro řezání AWJ/WJM

Základem řezacího stroje je hydraulická jednotka s vysokotlakým čerpadlem, které má příkon v rozmezí 11 – 75 kW a průtok vody 1,2 – 7,6 l/min. Pomocí multiplikátoru (násobiče tlaku) generuje tlak vody až přes 400 MPa (4000 Bar). Dnes jsou v průmyslové praxi testovány stroje s pracovním tlakem 600 MPa (6000 Bar) i vyšším. Tyto stroje však doplácí na svůj vyšší řezný výkon nižší životností mnoha komponent. Vysokotlakým vedením je voda dovedena až k řezací hlavě umístěné na portálu řezacího stolu, kde je přímo zaostřena usměrňovací komorou do clony trysky (otvor, který je většinou vyroben ze safíru nebo diamantu o rozměru cca 0,075 mm). Takto usměrněný paprsek jde dále do směřovací trubice (na kterou je napojen radiální nebo axiální přívod abraziva) nebo do vodní trysky, jejíž rozměry jsou 0,75 – 2,50 mm. Takto vytvořený paprsek, který je asi 0,8 – 1,5 mm široký proudí na materiál. Pokud jde čistě o vodní paprsek pak ten je široký cca 0,15 – 0,30 mm. Celá dráha řezu je řízena moderní CNC technikou, která řídí celý proces dle předem sestaveného programu. Směs vody, abraziva a úlomků se po provedení řezu zachycuje ve vaně umístěné pod řezaným materiálem a může se poté například recyklovat. (1,6)



Obr.2.1. Schéma 5eyacího systému (11)

3. Integrita povrchu

Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součásti. To umožňuje pochopit povahu a vlastnosti takto vytvořeného povrchu a dává možnost pro zlepšení použitých procesů a také umožňuje vytvoření obrobených ploch bez poruch.

Všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součásti, můžeme posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se potom mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity.

Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. (7)

3.1 Charakteristické jevy doprovázející řezný proces

Ještě efektivnější využití této technologie a její užití v dalších inovativních aplikacích nám umožní ještě hlubší poznání povahy významných dílčích jevů, které řezný proces při použití vodního paprsku vždy doprovází a jejichž důsledky se doposud nedařilo potlačit či až zcela eliminovat.

Chování vysokorychlostního paprsku je odlišné od paprsků proudících pomaleji. Celý proces řezání AWJ probíhá spolu s celou řadou vlastních specifik, které při použití konvenčních metod nejsou běžné. Důsledky lze pozorovat na výsledcích řezného procesu. Typický vzhled povrchu vytvořeného AWJ/WJM řezáním je jedním z těchto důsledků. V povrchu řezaném touto metodou se vyskytují dvě (více či méně výrazně) kvalitativně odlišné zóny – v závislosti na zvoleném stupni kvality obrobení. Dále lze také na výsledném povrchu sledovat rýhování s různě velkým poloměrem zaoblení, které je typické pro paprskové technologie. A nelze opomenout ani možnost výskytu tzv. „nosu“, což je nedořezaný trojúhelníkový útvar vznikající ve spodní části řezné spáry při vycházení paprsku z řezu. Je možné vyjmenovat ještě celou řadu dalších jevů, ale zde uvedené jevy patří mezi ty nejvíce výrazné a také nejvíce sledované především proto, že přímo ovlivňují výsledek řezného procesu (kvalitu obrobené plochy) a následně tak i spokojenost zákazníka. (2)



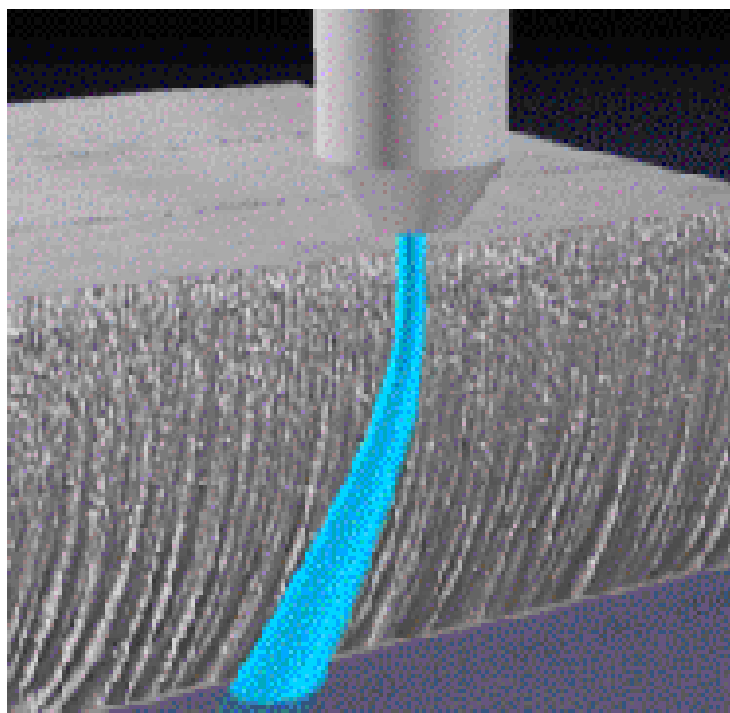
Obr.3.1.Příklad výsledného povrchu po řezání AWJ (9)

3.1.1 Vznik kvalitativně rozdílných zón a rýhování výsledného povrchu řezaného materiálu

Právě vznik kvalitativně odlišných zón výsledného povrchu může být odrazujícím faktorem k aplikaci této technologie. Na první pohled by se nyní mohlo zdát, že použití technologie AWJ není až natolik výhodné. Avšak po hlubším studiu příčin vzniklých jevů lze dojít k závěru, že právě opak je pravdou. Vhodnou volbou řezných podmínek je možné dostatečně eliminovat většinu negativních jevů a získat tak uspokojivý výsledek. Například po řezání AWJ se hodnoty drsnosti povrchu mohou pohybovat v oblasti pod $3,2\mu\text{m}$ s dosaženou přesností až $\pm 0,04\text{mm/m}$, přičemž standardní přesnost je dosahována v rozmezí $\pm 0,1$ až $\pm 0,2\text{mm}$. Vysokotlaký paprsek přináší další spoustu výhod jako nejčastěji uváděné (studený nedeformovaný řez bez poškození případných povrchových úprav materiálu, vysoká rychlost řezání a energetická účinnost atd.), pak není divu, že si získává stále větší oblibu.

Jakost povrchu obrobené plochy se obecně zhoršuje s rostoucí vzdáleností od místa vstupu paprsku do materiálu obrobku. Tato skutečnost je způsobena především tzv. „jevem váznutí paprsku“ v materiálu (viz. obr.3.2.). Vysvětlení je snadné. Jak již bylo řečeno, základním principem řezání vodním paprskem a hydroabrazivním paprskem je spolupůsobení dvou médií. Tedy při styku paprsku s řezaným materiálem paprsek odštěpuje jednotlivé částice materiálu

svou velkou kinetickou energií, ale zároveň ztrácí část své energie ztrácí v důsledku vzniklého tření mezi povrchem paprsku a povrchem materiálu obrobku. A právě tato ztráta se projevuje tím, že se paprsek vychyluje od původního směru. Obecně lze tedy konstatovat, že se vysokorychlostní paprsek pohybuje v každém bodě po kruhové dráze, jejíž poloměr se mění v závislosti na předcházející délce oblouku. Proto je tedy i typické rýhování v obrobeném povrchu „stočeno“ do zaoblených trajektorií. (2)



Obr.3.2.Vážnutí paprsku v materiálu. (10).

Často se také hovoří právě v souvislosti s jevem vážnutí paprsku v materiálu o mechanismu opotřebení materiálu. Kvalita výsledného povrchu je totiž silně ovlivněna právě převládajícím typem erozivního mechanismu. Charakter erozivního mechanismu se postupně mění. Od počínajícího direktivně brusného (účinkem abraziva a velké kinetické energie paprsku) až po vymílací, vztlačový a kavitační (účinky vodního paprsku a odebraného materiálu).

Ve vstupní oblasti (tedy v horní části řezu) je úběr materiálu výsledkem erozivního procesu opotřebení, spojeného s nárazem částice na povrch pevného materiálu. V této zóně má paprsek dostatečně velkou kinetickou energii a

osovou sílu řezání, která určuje stupeň opracování materiálu, materiál je tedy řezaný.

Postupně však při postupu paprsku obrobkem dochází ke slábnutí osové síly, paprsek je vychylován z původního směru a vzhledem k tomu, že při řezání vodním paprskem závisí erozní proces na úhlu dopadu částice na povrch, dochází následně spíše k „uvíznutí“ a tlačení částic v materiálu. Další oblast povrchu řezné spáry tedy vzniká jako důsledek deformačního opotřebení materiálu. Z tohoto důvodu má povrch po řezání specifické vlastnosti, viditelné rýhování ve spodní části obrobenej plochy.

Oblast řezné spáry můžeme dle převládajícího erozivního mechanismu rozdělit do následujících oblastí.

- oblast řezného opotřebení materiálu – hladká zóna bez výrazných nepravidelností či striací,
- oblast deformačního opotřebení materiálu – hrubší, rýhovaná zóna s výskytem rýh (striací).

S definicí předchozích dvou zón, daných převládajícím typem erozního mechanismu, lze analogicky rozdělit oblast řezné spáry také do oblastí specifikovaných podle výsledné struktury povrchu

- oblast hladké zóny – horní část řezné spáry, kterou lze charakterizovat jako homogenní s náhodným profilem a mírně izotropní texturou (vykazuje ve všech směrech stejné vlastnosti)
- oblast drsné rýhované zóny nebo-li zóny striací – spodní část řezné spáry. Její charakteristiky R_a a R_q prudce stoupají v závislosti se zvyšováním hloubky řezu a rychlosti posuvu paprsku.(2)



Obr.3.3.Povrch obrobené plochy po řezání AWJ (8)

3.1.2 Vznik specifického trojúhelníkového útvaru

Při zakončení řezného procesu AWJ na daném obrobku může vzniknout trojúhelníkový útvar, který je spodní částí řezné spáry. Tento útvar vzniká při nevhodné volbě řezných podmínek, nebo při zvolení nižšího stupně kvality řezání. Jedná se o další specifikum, které prozradí, že byl daný materiál řezaný pomocí paprskové technologie AWJ / WJM.

Tento charakteristický útvar je v některých literaturách nazývaný jako „nos“. Vzniká „bleskovým“ překmitnutím řezného paprsku při dořezávání. Tento překmit je záležitostí setin vteřiny. Jeho bližšímu zkoumání doposud nebyl věnován dostatečně velký díl pozornosti. I přesto je známo, proč k tomuto jevu dochází. Tento jev je připisován typům vodního paprsku a jejich zvláštním hydrodynamickým vlastnostem. Existují tři nejčastější využívané druhy vodních paprsků, které závisí na možnostech strojního zařízení, jeho konstrukci a požadavku na použití. Jsou to:

- Systém pulzujícího paprsku. Tento systém používá opakované a krátkodobé trvání impulzu paprsku, vznik tlakových špiček, které urychlují rozšiřování řezné mezery. Tato metoda je vhodná pro vrtání a řezání.
- Systém kontinuálního paprsku je charakterizovaný stálou energií hladiny paprsku pro celý proces. Je to nejvíce rozšířená metoda pro dělení materiálů. Používá se pro řezání prakticky veškerých druhů materiálů.
- Systém kavitačního paprsku pracuje na principu jevu lokálního porušení materiálu destrukční silou kavitačních bublin. Kvítující paprsek je paprsek kontinuální s obsahem kavitačních bublinek.

Vodní paprsek s abrazivem je právě kavitačním paprskem, který má navíc jiné chování než ostatní vodní paprsky, které proudí pomaleji. Na experimentech bylo zjištěno, že je tato odlišnost způsobována právě proudem kavitačních bublin. Kavitační bubliny mají původ v turbulencích tekutiny poblíž povrchu řezaného materiálu. Tato turbulence se vytváří díky rozdělení abrazivního vodního paprsku na dvě rozdílné oblasti:

- oblast na povrchu proudu o vysokém tlaku, kde rotují částice abraziva a tvoří erozní řeznou frontu,
- vnitřní oblast toku, kde je vysoká rychlost proudění tekutiny (odlišná od rychlosti na povrchu proudu).

Hydrodynamický tvar paprsku lze zjednodušeně popsat, jako expandující trubici se směsí tekutiny a vzduchu uvnitř, která je ohraničena rotujícími abrazivními částicemi na povrchu.

Potlačení jevu vytvoření nedořezaného trojúhelníkového nosu na výstupní ploše lze zamezit, vhodnou volbou řezných podmínek. Vzhledem k tomu, že se tento útvar vytvoří ve většině případů pouze při volbě nižší kvality řezu (dělicí řez), je zřejmé, že se nabízí tyto možnosti řešení:

- volba řezných podmínek vyšší kvality – pro získání lepšího výstupního povrchu,
- vícečetný průchod paprsku,
- včasná změna úhlu dopadu paprsku podle řezného plánu,
- oscilační řezání.(2,11)

3.1.3 Vlastnosti řezné spáry

Tvar řezného nástroje vodního paprsku (rozšiřující se trubice) a jemu vlastní jev váznutí má také vliv na velikost a tvar vznikající spáry v řezaném materiálu. Z tohoto důvodu může dojít k podřezávání řezné hrany v materiálu či naopak k nedořezání a to i přesto, že již byla provedena celá řada studií věnovaných metodám vedoucím k usměrnění a zlepšení charakteristik řezného paprsku.

Při nižších posuvech dochází k podřezávání pod horní hranu materiálu, v důsledku zpomalování (váznutí) paprsku a následného vychylování abrazivních částic z přímého směru dopadu. Ty pak po změně směru letu

naráží do děleného materiálu mimo bezprostřední oblast řezu a tím rozšiřují řeznou spáru do tvaru kužele. Při zvýšení rychlosti posuvu se naopak řezná spára zužuje. To ale může sebou nést další negativa jako nedořezání materiálu nebo vznik striací (rýhování ve spodní části řezné spáry).

Při posuzování kvality výsledného povrchu řezné spáry po řezání technologií AWJ/WJM je největší pozornost věnována následujícím vlastnostem:

- kvalita povrchu řezné spáry (drsnost, vlnitost)
- šířka řezné spáry
- tvar řezné spáry (kuželovitost)

Při požadavku zachování vyšší tvarové a rozměrové přesnosti je možné předcházet podřezání a nedořezání řezné hrany pomocí několika metod:

- včasná změna úhlu dopadu paprsku podle řezného plánu
- oscilační řezání
- zlepšení charakteristik paprsku přidáním aditiv do vody jde o polymery s lineárními molekulami
- přidání vhodného množství abraziva
- volba optimální vzdálenosti trysky od obrobku s ohledem na typ řezaného materiálu
- volba optimální posuvové rychlosti s ohledem na řezaný materiál(2)

3.2. Vliv mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu na řezný proces

Volba řezných podmínek má výrazný vliv na kvalitu a tvar řezné spáry a tedy v souhrnu na kvalitu celého výstupního povrchu řezaného materiálu. Dále je nutno podotknout, že veškeré parametry je nutné přizpůsobit pro konkrétní typ materiálu. Existence dvou odlišných zón při řezání AWJ paprskem svědčí o tom, že vlastnosti materiálu (definované především jeho tvrdostí) nelze zcela zanedbat. Proces AWJ je v porovnání s konvečním obráběním s definovanou geometrií řezné hrany méně citlivý na tvrdost materiálu, ale na druhé straně svůj vliv sehrává i houževnatost materiálu. Při hlubším studiu vlivu mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu bylo zjištěno, že na osovou sílu řezání, která určuje stupeň opracování materiálu, má především vliv pevnost v tahu, pevnost

v tlaku, modul pružnosti a tvrdost materiálu. Například při řezání materiálů s vysokou tvrdostí jako jsou SiC nebo B4C se doporučuje volit větší hloubky řezu v porovnání se stejně tvrdými materiály, které jsou zároveň houževnaté jako třeba WC, který při konstantních podmínkách řezání vykazuje až 4 krát menší hloubku řezu než výše uvedené materiály SiC a B4C. Hodnota rychlosti posuvu vždy závisí na materiálových charakteristikách obrobku. Z toho usuzujeme, že závislost poměru dosažené hloubky řezu na rychlosti posuvu h/v_p je komplexní povahy a závisí na všech parametrech řezného procesu, nejen na těch, které ovlivňují chování paprsku. Patří sem vlastnosti řezaného materiálu, druh a množství abraziva, tlak, rozměry použitých trysek, ale také omezení daná strojem, jako je maximální možná rychlost posuvu, velikost možného zrychlení, tuhost soustavy a jiné. Tato omezení stroje jsou dána na počátku řezné operace a ve většině případů jsou neměnné po celou dobu řezného procesu. Proto se pro materiály odlišných vlastností (kov/sklo, plastúkámen) při použití stejných řezných podmínek (tlak, vzdálenost, průměry trysek, množství a typ abraziva, rychlost posuvu) dosáhne rozdílných výsledků řezného procesu (drsnot povrchu, velikost jednotlivých zón, tvarová přesnost, dosažená hloubka řezu apod.). (2)

3.3. Porovnání technologie AWJ s ostatními netradičními metodami obrábění

Proces	Intenzita úběru materiálu	požadavky na výkon	Dosahovaná drsnost povrchu Ra [μm]
ECM - elektrochemické obrábění	33 mm ³ /s na 1000A (pro oceli)	stejnosměrné napětí do 30 V proud do 10 000A	0,4 - 6,3
CHM - chemické obrábění	okolo 0,30 mm ³ /s pro oceli v závislosti na ploše	-	-
EDM - elektrojiskrové obrábění	okolo 7 mm ³ /s	proud do 20 A, napětí do 400 V	3.12
LBM - obrábění laserem	-	4000 V	0,8 - 6,3
PAM - obrábění plazmou	okolo 1000 mm ³ /s	200 kW	-
EBM - obrábění elektronovým paprskem	do 5 mm ³ /s	130 V, 5000 mA	0,8 - 6,3
AJM - obrábění proudem abraziva	do 1 mm ³ /s	typický výkon 2 - 5 kW	-

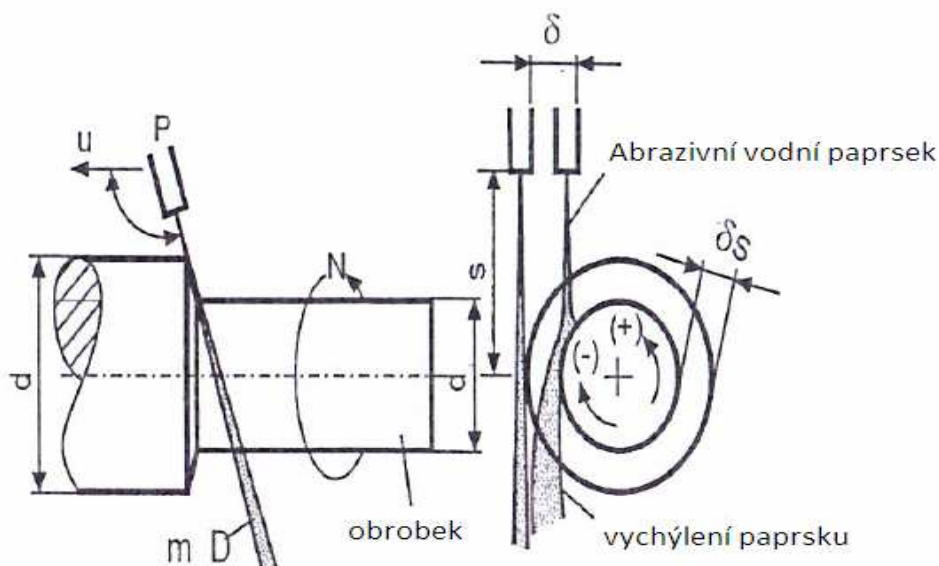
USM - obrábění ultra-zvukem	4-60 mm ³ /s	-	0,3 - 0,8
AWJ - obrábění vodním paprskem	50 - 200 mm ³ /s	10 - 50 kW	1,10

Tab.3.Porovnání netradičních metod obrábění (11)

4.Technologické aplikace AWJ

Kromě běžného dělení materiálu abrazivním paprskem se tato technologie v poslední době vyvíjí a začíná používat pro obráběcí operace jako je soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů (především u těžkoobrobitelných materiálů). Dále také tato metoda může být použita pro gravírování a tvarové 3D řezání. (2,11)

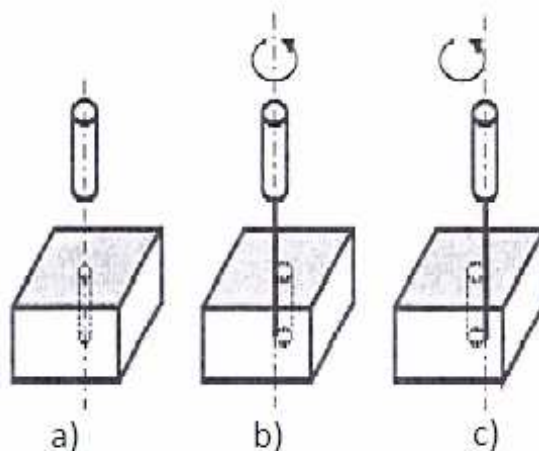
4.1.Soustružení pomocí AWJ – při soustružení obrobek rotuje a AWJ paprsek se posouvá k axiální ose obrobku. Úběr materiálu je zabezpečený radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky řezu. Princip soustružení je znázorněn na Obr.4.1. (2,11)



Obr.4.1.Soustružení abrazivním vodním paprskem (11)

4.2.Vrtání – metoda AWJ se také dostává do popředí zájmu jako perspektivní technologie u vrtání a vyvrtávání především těžkoobrobitelných materiálů jako jsou keramika, sklo, niklové slitiny (používané pro plynové turbíny) a další.

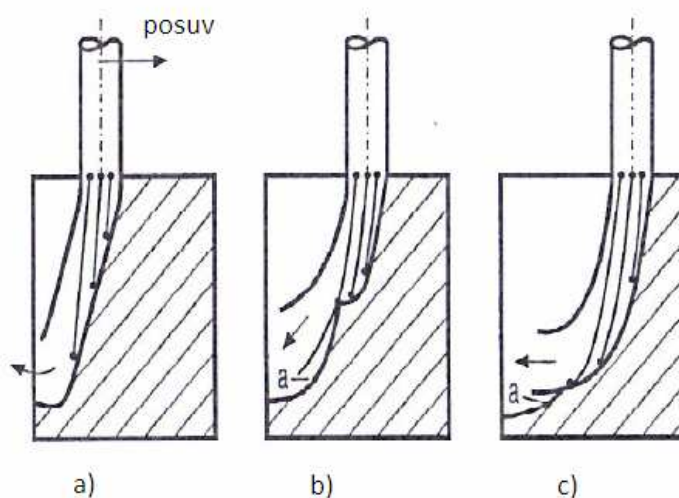
V současnosti je vyvinuto několik způsobů vrtání otvorů charakterizovaných vzájemným pohybem obrobku a vodního paprsku. Nejčastěji se používá vrtání se stacionárním paprskem a obrobkem, vrtání rotujícím nebo kmitajícím paprskem a stacionárním obrobkem tzv. vyřezávání středu otvoru. (2,11)



Obr.4.2. Způsoby vrtání pomocí AWJ

a) předvrtávání b) Vyřezávání c) frézování otvorů

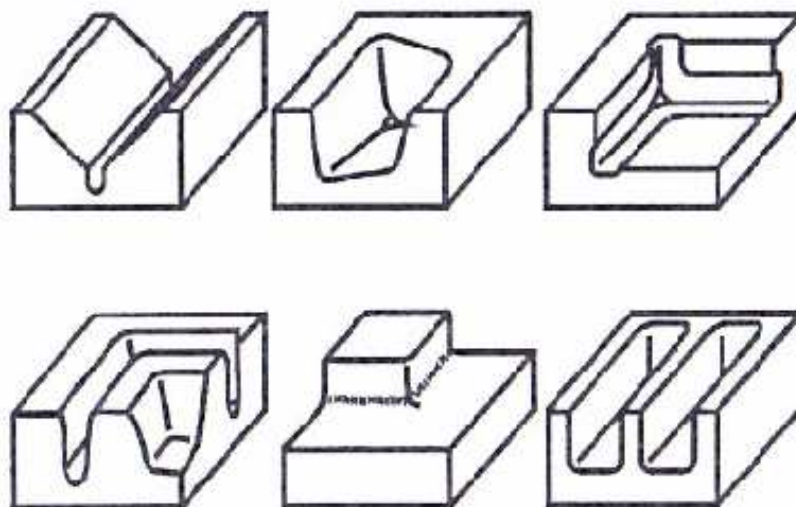
4.3.Frézování pomocí AWJ – tato metoda je nejvíce využívána pro „obrábění“ skla a minerálů, ale také tvarově složitých obrobků z kovových i nekovových materiálů, které jsou znázorněné na obr.4.3. (2,11)



. Obr.4.3. Řezný cyklus při frézování AWJ (11)

- a) začáteční tvoření stopy řezu
- b) stabilizovaná stopa řezu s viditelnými stupněmi posuvu paprsku
- c) vyrovnávání stupňů řezu

Při frézování se jedná o řezání a ne o dělení materiálu, tudíž nedochází k prořezání obrobku v celé jeho tloušťce. Hloubka řezu je tedy menší než celková tloušťka materiálu. Řezný cyklus frézování je znázorněn na obr. , kde jsou zřetelně viditelné řezné stupně. Frézování AWJ paprskem je proces, při kterém vodní paprsek opakovaně přechází po obráběné ploše a postupně tvoří tvar blížký konečné podobě obrobku. (2,11)



Obr.4.4. příklady frézování různých geometrických tvarů (11)

Ve strojírenství se frézování AWJ používá například při výrobě tvářecích nástrojů. Další využití nachází i v jiných oblastech, jako je kamenosochařství při opracování a leštění žuly, mramoru, pískovce a opuky. Frézování pomocí AWJ velmi úzce navazuje na techniky gravírování, využívané především v reklamní či umělecké oblasti. (2,11)

4.4.Gravírování pomocí AWJ – Při gravírování technologií AWJ stejně jako u jiných metod nedochází k prořezání celé tloušťky obrobku, ale pouze k odstranění povrchové vrstvy do určité předem stanovené hloubky. Výsledný reliéf je vytvářen vodním paprskem buď přímo a nebo je následně opracovaný materiál ještě dotvořen umělcem, který už pouze dobrousí tvar a detaily práce pomocí konvenčně užívaných nástrojů (diamantový hrot, čakan).



Obr.4.5.Vytryskání nápisu pomocí technologie AWJ do nerezové desky (8)

Při tvorbě plastických reliéfů paprsek postupně odebírá jednotlivé vrstvy materiálu a vytváří tak požadovaný prostorový či barevný efekt. Ten vzniká použitím vícevrstvých materiálů (plasty, eloxovaný hliník nebo kombinace dvou plastů či plastu s kovem).



Obr.4.5.Ukázka gravírování reliéfu do skla pomocí technologie AWJ (drobné detaily byly dokončeny ručně – broušením) (8)

Technologie AWJ začíná konkurovat doposud využívaným metodám gravírování, jako nekonvenčním laserovým gravírkám i konvenčním metodám tzv. mechanického rytí (frézování, rytí diamantovým hrotem, čakany atd.). Konkuruje jim především proto, že podstata samotného úběru materiálu technologií AWJ umožňuje gravitovat prakticky všechny typy materiálů (křehké, hůře obrobitelné, pružné či sendvičové), přitom úspěšnost mechanického rytí byla podmíněna charakteristikami opracovaného materiálu (dobře obrobitelný, dostatečně tvrdý – aby adhezně neulpíval na fréze a nebyly vytahovány okraje, ale zároveň nesměl být příliš křehký – aby se okraje neštípaly. V těchto případech se dříve využívaly diamantové hroty.

Technologií AWJ je na rozdíl od použití laseru možno gravitovat sklo, minerály, keramiku, ale i materiály hořlavé či tepelně citlivé, aniž by došlo k obavám ze vzniku karcinogeních či jedovatých látek, vznícení nebo přílišného vypálení motivu do stran

Na rozdíl od jiných technologií je jediným omezením technologie AWJ případný vliv vlhkého prostředí na materiál. Proto je důležité znát hodnotu relativní nasákavosti, hloubku pronikání vody a intenzitu ovlivnění materiálu vodou (koroze).

Co se týče různých tvarů, tak je zde omezení minimálního zaoblení vnitřních rohů dáno průměrem řezacího paprsku. K obrábění měkkých a tenkých materiálu, kde k řezání není nutné abrazivum bývá průměr vodního paprsku

kolem 0,2 mm. Hydroabrazivní paprsek je určen pro silnější a odolnější materiály. Průměr hydroabrazivního paprsku je 0,5 – 2,5 mm (podle typu a stupně opotřebení abrazivních trysek). Protože dráha řezacího ramene je upravována korekcí, která parametr řezacího paprsku zohledňuje, tak průměr paprsku nemá žádný vliv na rozměrovou přesnost výrobku. (8)



Obr.4.6.Gravírování reliéfu pomocí technologie AWJ (8)

Závěr

V dnešní době je ve světě běžné tryskat pomocí technologie vysokotlakého vodního paprsku s příměsí abraziva jakékoliv materiály, ale pouze do určité hloubky. Abrazivní vodní paprsek se díky svým přednostem mezi které patří hlavně vysoká rychlost řezání, schopnost řezat jak rovinné tak tvarové plochy, minimální tepelné ovlivnění povrchu materiálu a další hodí perfektně jako moderní technologie vhodná pro 21. století. Jelikož se jedná o poměrně novou metodu obrábění, která není ještě dostatečně prozkoumaná tak se díky její flexibilitě doplňují stále nové oblasti využití. Všeobecně se metoda řezání vodním paprskem nabízí tehdy, když potřebujeme aby materiál nebyl deformován nebo tepelně ovlivněn.

Technologie řezání vodním paprskem si získává významný podíl nejen v průmyslové výrobě, ale také díky gravírování a frézování v oblastech umění. Díky systému 3D řezacích hlav, který byl vyvinut již v 90. letech se tato technologie prosadila v 3D obrábění. Je tedy možno obrábět dílce ve třech osách včetně rotace až 360°.

Bakalářská práce byla dále zaměřena na integritu povrchu materiálu obrobku po řezání vodním paprskem. Topografie povrchu po řezání AWJ je málo prozkoumaná oblast. AWJ paprsek zanechává viditelné rýhování na obrobené ploše obrobku. Podle dosavadních poznatků se drsnost povrchu mění lineárně se zvyšováním hloubky řezu v oblasti hladké zóny. Parametry drsnosti R_a a R_q vykazují pouze slabou závislost na řeznou rychlost a jsou téměř nezávislé na hloubku řezu v hladké zóně. Drsnost povrchu má lineární průběh pro zrnitost abraziva. Čím hrubší je zrno abraziva tím je dosahovaná drsnost R_a horší. Proto se pro jemné opracování používá malá zrnitost, avšak paprsek s malými částmi abraziva řeže pomaleji, protože ztrácí rychleji svou kinetickou energii. Lineární průběh drsnosti je i při změně tlaku vodního paprsku. Vyšší tlaky vody vytváří hladší povrchy a zároveň urychlují úběr materiálu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁKOVÁ,J.,DVOŘÁK,J. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. Glassrevue.com, Vol.2007, No.21, ISSN 1802-8497, [online]. [cit. 23. března 2010]. Dostupný na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>>.
2. DVOŘÁKOVÁ,J.,DVOŘÁK,J. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. Glassrevue.com, Vol.2008, No.15, ISSN 1802-8497, [online]. [cit. 5. dubna 2010]. dostupný na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>>.
3. ÚSTAV GEONIKY AV ČR. [online]. [cit. 29. března 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ugn.cas.cz/>>.
4. VALÍČEK,J., HLOCH,S. Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením. OSTRAVA: Nakladatelství ÁMOS, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
5. AB JET HAVLÍČKŮV BROD. [online]. [cit. 29. března 2010]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.abjet.cz/>>.
6. CHPS CHOMUTOV. [online]. [cit. 12. dubna 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.chps.cz/>>.
7. Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. [online]. [cit. 22. března 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gps.fme.vutbr.cz/>>.

8. DVOŘÁKOVÁ, J., DVOŘÁK, J. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. [online]. [cit. 5. dubna 2010] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj>>.
9. VALÍČEK, J., Měření a analýza povrchu při řezání abrazivním vodním paprskem. [online]. [cit. 7. dubna 2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj>>.
10. JIT Waterjet. [online]. D[cit. 12. května 2010] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.jitwaterjet.com/faq.html>>.
11. MAŇKOVÁ, I. Progresivne technologie, Viena – vydavatelství a tiskárny, Košice 2000 - ISBN 80-7099-430-4.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
AWJ		Abrasive Water Jet (abrazivní vodní paprsek)
WJM		Water Jet Machining (obrábění)
R_a	μm	střední aritmetická úchylka profilu
R_q	μm	střední kvadratická hodnota drsnosti
CNC		Computer Numerical Kontrol (počítačové číslicové řízení)